第42卷 第2期
2025年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 42 No. 2
Feb. 2025

干旱、盐分和酸胁迫对药用植物马利筋和苋菜种子萌发的影响

贾风勤， 黄敏桃， 邓 利， 李金玲， 梁梅华， 伊洪伟， 宋希娟

（广西生态工程职业技术学院林业工程学院，广西 柳州 545004）

摘 要： 以药用植物马利筋和苋菜为材料，采用聚乙二醇（PEG-6000）、NaCl和pH梯度溶液模拟干旱、盐分和酸胁迫环境，研究两种植物种子萌发对环境胁迫的响应程度，为探讨其在干旱、盐碱地区的引种栽培和高品质药材生产提供理论依据。结果表明：不同浓度PEG和NaCl显著抑制马利筋和苋菜的种子萌发，总体表现为萌发率、发芽指数均随浓度的增加而降低；将经过14 d胁迫后的未萌发种子复水处理，出现快速补偿萌发；复水处理后仍未萌发种子TTC染色结果显示种子依旧保持活力，两种药用植物具活力种子占比均值分别为84%和90%，显著高于对照或未显著降低；pH值为3~6范围内，马利筋和苋菜种子萌发率均超过57%和83%，未萌发种子复水萌发和TTC染色结果表明胁迫处理造成约10%的马利筋种子和15%的苋菜种子死亡，两种药用植物具活力种子占比均值分别高达91%和87%。马利筋和苋菜种子在萌发过程中对干旱和盐胁迫具有一定的耐性，对酸胁迫具有较强的耐性，两种植物可采取提前、延迟或休眠的萌发策略以适应不同胁迫环境，本研究厘清了马利筋和苋菜种子萌发在3种非生物胁迫因子处理下的萌发特征及差异，为两种药用植物生产和品质提高提供了理论依据。

关键词： 药用植物；马利筋；苋菜；种子萌发；耐受性

全球气候变化及人类不合理的土地利用方式所引起的土壤质量及生产力下降，包括酸化、盐碱化等，严重限制了药用植物种子萌发和生长发育，影响着药用植物的品质和产量，已成为阻碍我国中药材产业可持续发展的主要非生物胁迫因子。高浓度的盐溶液诱发植物生理性干旱[1]，破坏植物细胞内离子平衡[2]，降低酶活性等[3]；随着土壤pH值的降低，钾、磷等盐基离子大量淋失，活性铝溶出量增加导致根系生长明显减少[4]，阻碍营养元素的吸收，降低对病原菌的抵抗力；干旱胁迫造成细胞内多种活性氧的生成，对细胞产生毒害[5]等，扰乱药用植物正常生长，甚至造成植物死亡，影响其质量和产量[6]。

马利筋（*Asclepias curassavica* L.）为萝藦科一年或多年生草本植物，是被冠以医神名字的民族草药，性味苦寒，有生肌止痛、消炎散肿、活血止血的功效，被用于强心、哮喘、腹泻、风湿等疾病治疗[7]；苋菜（*Amaranthus tricolor* L.）是为苋科一年生植物，兼具菜、粮、药等多种用途，有“菜中维生素丸”“补血菜”之称[8]。目前，已从马利筋中解析有结构多样、具有很强的抗肿瘤和强心作用的强心苷及强心甾体，其中C_{21}甾体类化合物Asclepiasterol具有很强的肿瘤多药耐药逆转作用[9]，两者的实际应用价值很高。马利筋和苋菜多栽种于我国长江以南各省区，均可通过种子繁衍后代，目前对其研究涉及组织培养[10]等方面，王廷芹等[11]研究发现盐胁迫抑制苋菜种子萌发，但是未能明确在盐胁迫下未萌发的种子是否还具有生活力，并且有关马利筋和苋菜种子对干旱响应的研究报道甚少，尤其是在南方广泛分布的酸性土壤上马利筋和苋菜种子萌发情况鲜有报道。

种子萌发作为植物生活史中的一个重要阶段，是幼苗定植和种群更新的主要环节，对开展药用植物应用具有重要指导价值。一般情况下，水分、土

收稿日期： 2024-05-16； **修订日期：** 2024-10-10
基金项目： 广西生态工程职业技术学院人才引进科研专项（GXSTKYZX202307003）；新疆维吾尔自治区天山青年计划项目（2018Q028）资助
作者简介： 贾风勤（1973-），女，博士，教授，主要从事种子生态研究. E-mail: 1002249491@qq.com
通讯作者： 宋希娟. E-mail: 119248283@qq.com

壤pH值、盐度等都可能成为种子萌发的胁迫因子,但环境胁迫在药用植物道地药材的优良性状及品质形成过程中往往又发挥着不可或缺的独特作用[12]。为此,本研究通过系统开展马利筋和苋菜种子萌发实验,采用聚乙二醇(PEG-6000)、NaCl和pH值梯度溶液模拟干旱、盐分和酸胁迫环境,考察两种植物响应环境胁迫的萌发特征,以期为其在干旱、盐碱地区的引种栽培和高品质药材生产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

马利筋种子于2023年8月采自广西生态工程职业技术学院药用植物百草园;苋菜种子于2023年8—9月采自广西生态工程职业技术学院校园周边农田(24°16′N,109°13′E,海拔108 m)。所采集的种子通风晾干清理后在4 ℃低温贮藏。

1.2 实验设计

参照Michel等[13]方法,设置质量分数为5%、10%、15%、20% PEG(聚乙二醇,PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫;设置50 mmol·L^{-1}、100 mmol·L^{-1}、150 mmol·L^{-1}、200 mmol·L^{-1}NaCl溶液模拟盐胁迫;采用CH_3COOH调节配制pH值为3、3.5、4、4.5、5、6共计6个梯度模拟酸胁迫,均以蒸馏水处理为对照(CK),实验共设置15组处理。采用培养皿纸上培养法进行种子萌发实验,每个处理4个重复,培养条件为25 ℃、12 h光照/12 h黑暗。

1.3 种子萌发方法

将种子置于铺有两层滤纸的9 cm培养皿内,每皿50粒种子,分别加入7 mL各水平的pH值溶液、PEG溶液和NaCl溶液,各胁迫处理下的萌发时长为14 d。为厘清胁迫处理后未萌发种子活力情况,对未萌发种子先进行复水萌发处理,即在第14 d时记录各胁迫萌发实验中未萌发的完好种子数量,并将其转移至蒸馏水中进行复水萌发,复水萌发时长为7 d;第21 d时对复水后未萌发的完好种子进行1% TTC (2,3,5-氯化三苯基四氮唑)染色,24 h后检验种子活力,如果胚被染成红色,则表明种子具活力[14],记为染色种子。所有萌发实验均以胚根露出种皮2 mm时视为萌发,每日统计萌发种子数。

1.4 数据处理

萌发率、发芽指数等萌发指标按如下公式计算:

$$萌发率=\frac{14\ d内萌发种子数}{供试种子数}\times 100\% \quad (1)$$

$$发芽指数=\sum\frac{Gt}{Dt} \quad (2)$$

式中:Gt为在第t日萌发的种子数;Dt为相应的发芽日数[15]。

$$恢复萌发率=7\ d内萌发种子数/供试种子数\times 100\% \quad (3)$$

$$具活力种子占比=萌发率+恢复萌发率+\frac{染色种子数}{供试种子数}\times 100\% \quad (4)$$

采用SPSS 19.0软件进行数据分析,对萌发率、发芽指数等各项萌发指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA),用Duncan多重比较检验不同处理间的差异显著性,用Excel 2009软件进行绘图。

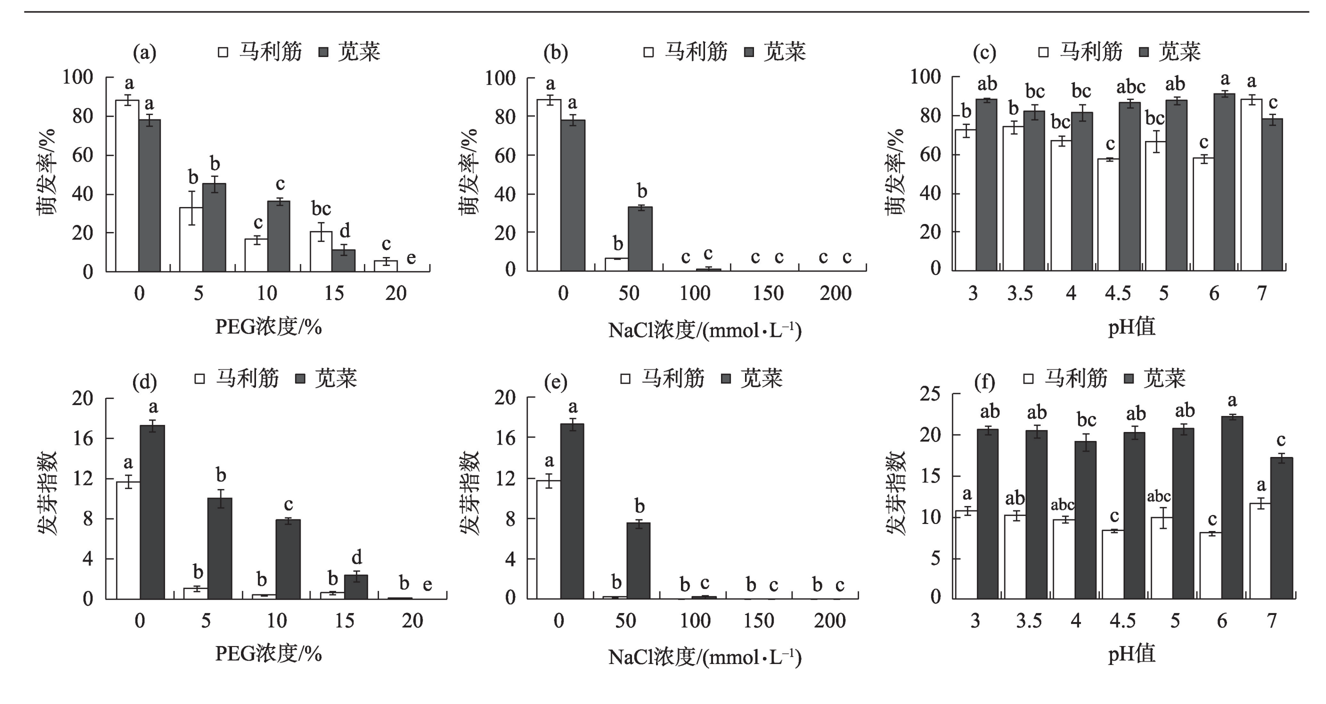
2 结果与分析

2.1 不同胁迫处理对马利筋和苋菜种子萌发指标的影响

不同PEG浓度对马利筋和苋菜种子萌发影响情况相似。随着PEG浓度逐渐升高,两种药用植物种子萌发率、发芽指数均呈下降趋势且显著低于对照。当PEG浓度为5%时,马利筋和苋菜种子萌发已受到显著抑制,萌发率均低于50.00%;当PEG浓度为20%时,萌发种子数量不足5.00%,萌发几乎被完全抑制(图1)。

不同NaCl浓度对马利筋和苋菜种子的萌发产生了显著影响。各盐浓度处理下的种子萌发率、发芽指数均显著低于对照,且随着盐浓度的增加呈显著下降趋势。在NaCl浓度为50 mmol·L^{-1}时,马利筋和苋菜种子各项萌发指标均达到最大值,但萌发率、发芽指数仅分别维持在6.92%、33.17%和0.21、7.54,萌发被显著抑制;当NaCl浓度≥100 mmol·L^{-1}时,两者均无种子萌发(图1)。

不同pH处理下,马利筋和苋菜种子呈现不同的萌发规律。酸胁迫抑制马利筋种子萌发,pH为3~6时,马利筋种子的萌发率和发芽指数最高分别达到74.25%、10.82,但较对照降低了14.17%、0.91,与对照间差异显著,各项萌发指标随pH的升高均呈不规律变化趋势。酸胁迫促进苋菜种子萌发,pH为3~6时均有超过80%以上的种子萌发,高于对照



注:不同小写字母表示同一胁迫不同处理之间差异显著(P<0.05)。

图1 干旱、盐和酸胁迫对马利筋和苋菜种子萌发率和发芽指数的影响

Fig. 1 Effects of drought, salt and acid stresses on seed germination percentage and germination index of *Asclepias curassavica* and *Amaranthus tricolor*

(78.13%),对照与pH为3.5~4.5时的种子萌发率、pH为4时的发芽指数间无显著差异;各项萌发指标均随着pH升高而呈先降低后增加的趋势(图1)。

2.2 不同胁迫处理对马利筋和苋菜种子萌发进程的影响

不同PEG浓度主要影响着马利筋和苋菜种子初始萌发时间及高峰期内萌发种子数量(图2)。PEG浓度由0(CK)增加至20%时,马利筋种子初始萌发时间由第2 d依次延后至第4 d、4 d、4 d、7 d,高峰期内种子萌发数量从31.96%迅速下降至19.79%、5.12%、5.83%和4.16%。对于苋菜种子而言,除20% PEG处理的种子在整个实验期内无萌发外,其余浓度处理的种子均在第2 d发芽,萌发种子数量随PEG浓度升高而下降。

不同NaCl浓度对马利筋和苋菜种子萌发进程有着相似的影响(图2)。对马利筋而言,对照种子初始萌发时间为第2 d,第3 d有近30.00%的种子萌发,当NaCl浓度为50 mmol·L^{-1}时初始萌发时间延后至第5 d,萌发种子数量不足2.00%,其余浓度处理均无种子萌发。就苋菜而言,NaCl浓度为50 mmol·L^{-1}时初始萌发时间与对照一致,但高峰期内萌发的种子数量则较对照下降了近1/3,NaCl浓度增加为100 mmol·L^{-1}时,初始萌发时间和萌发高峰时间虽仅延后1 d,但萌发种子数量却急剧减少,萌发率仅为0.91%。

不同pH处理下,马利筋和苋菜种子的萌发进程与对照基本一致,对马利筋而言,对照在第2 d有种子萌发,高峰期内萌发种子数量占萌发种子总数的80%,pH为3~6时的种子初始萌发时间(除pH为3.5时初始萌发时间为第3 d)均与对照相同,高峰期内萌发种子数量分别占萌发种子总数的92%、93%、93%、89%、92%和91%;对苋菜而言,对照初始萌发时间为第2 d,高峰期内萌发种子数量占萌发种子总数的90%,pH为3~6时第1 d即有种子萌发,且高峰期内萌发种子数量分别占萌发种子总数的98%、96%、95%、95%、95%和98%,表明酸胁迫处理在一定程度上有利于马利筋和苋菜种子萌发(图2)。

各水平PEG、NaCl和pH处理下马利筋和苋菜种子在萌发高峰期之后,种子萌发数量均增加缓慢或无种子萌发,当达到一个峰值后萌发率基本保持不变。

2.3 不同胁迫处理对马利筋和苋菜种子活力的影响

不同胁迫处理下马利筋和苋菜种子的萌发率均未达到100%,未萌发种子的命运有3种,即具活力且复水处理下可萌发、具活力但复水处理下保持休眠或种子受到伤害失去活力而死亡。

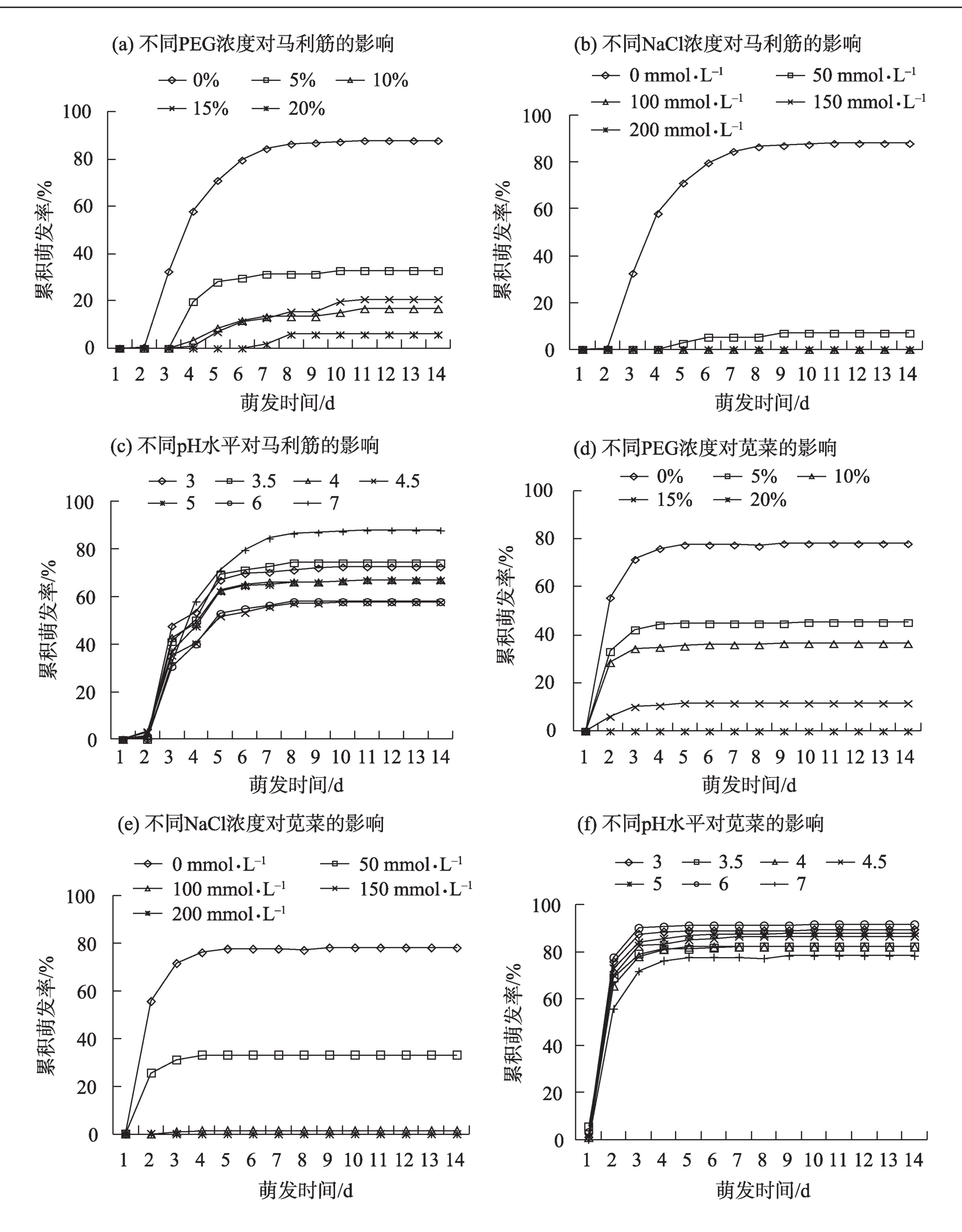


图2　干旱、盐和酸胁迫下马利筋和苋菜种子的萌发进程

Fig. 2　Germination process of *Asclepias curassavica* and *Amaranthus tricolor* under drought, salt and acid stresses

马利筋和苋菜种子在PEG胁迫解除复水处理后，完好种子均有大量萌发，胁迫解除后的恢复萌发率均随原胁迫浓度的升高而呈增加趋势，即使在20%PEG浓度下萌发率仅为5.84%的马利筋种子和0.00%的苋菜种子，恢复萌发率分别高达71.25%和78.97%。TTC染色结果表明，两种植物种子在胁迫解除后的染色种子占比均随原胁迫浓度的升高而呈降低趋势，两者约有5.00%~15.00%的少量种子保持休眠。与对照相比，不同浓度PEG处理未显著改变马利筋种子活力，具活力种子占比超过82.09%；虽显著降低苋菜种子萌发率，但具活力种子占比均高于对照(78.62%)，表明两种药用植物种子可通过延迟萌发、进入休眠等萌发策略应对干旱环境(表1)。

NaCl胁迫处理后的马利筋和苋菜种子呈现截然相反的恢复萌发和休眠规律。马利筋种子在胁迫解除后，有11.60%~36.28%的种子萌发，恢复萌发率随原胁迫浓度升高而降低；有46.54%~71.67%的保持休眠状态，休眠率随原胁迫浓度的升高而增加。苋菜种子在胁迫解除后有超过50%的种子萌发，恢复萌发率随原胁迫浓度升高而增加，最高达

表1 PEG胁迫对马利筋和苋菜种子萌发数量特征的影响

Tab. 1 Effect of PEG stress on germination quantitative characters of *Asclepias curassavica* and *Amaranthus tricolor*

处理		马利筋 萌发率/%	马利筋 恢复萌发率/%	马利筋 染色种子占比/%	马利筋 具活力种子占比/%	苋菜 萌发率/%	苋菜 恢复萌发率/%	苋菜 染色种子占比/%	苋菜 具活力种子占比/%
PEG浓度/%	CK	88.43±2.63a	0.00±0.00c	2.89±0.96b	91.32±1.69a	78.13±2.90a	0.00±0.00d	0.50±0.50b	78.63±2.57c
	5	32.92±8.72b	42.39±9.89b	13.02±2.47a	88.33±6.87a	45.28±4.33b	22.04±4.92c	14.56±2.73a	81.87±2.55bc
	10	16.82±2.28c	63.35±4.07a	6.56±2.72ab	86.74±5.94a	36.44±2.16c	46.28±2.56b	14.71±2.73a	97.43±0.94a
	15	20.83±4.74bc	64.17±7.78a	6.46±2.55ab	91.47±5.16a	11.59±2.88d	57.38±4.97b	13.47±0.82a	82.44±3.02bc
	20	5.84±2.10c	71.25±7.49a	5.00±5.00ab	82.09±9.36a	0.00±0.00e	78.97±4.36a	10.26±2.30a	89.23±2.32b

注:同列不同小写字母表示不同处理下同一指标的差异显著(P<0.05)。下同。

表2 NaCl胁迫对马利筋和苋菜种子萌发数量特征的影响

Tab. 2 Effect of NaCl stress on germination quantitative characters of *Asclepias curassavica* and *Amaranthus tricolor*

处理		马利筋 萌发率/%	马利筋 恢复萌发率/%	马利筋 染色种子占比/%	马利筋 具活力种子占比/%	苋菜 萌发率/%	苋菜 恢复萌发率/%	苋菜 染色种子占比/%	苋菜 具活力种子占比/%
NaCl浓度/(mmol·L^{-1})	CK	88.43±2.63a	0.00±0.00d	2.89±0.96c	91.31±1.69a	78.12±2.90a	0.00±0.00d	0.50±0.50c	78.63±2.58c
	50	6.92±0.25b	36.28±4.22a	46.54±4.71b	89.74±1.78a	33.17±1.35b	50.76±1.12c	7.01±3.10ab	90.95±1.30a
	100	0.00±0.00c	23.69±1.74b	47.50±5.50b	71.19±5.67c	1.40±0.87c	81.77±3.53b	9.62±1.96a	92.79±1.49a
	150	0.00±0.00c	10.47±4.55c	64.73±7.27a	75.20±3.17bc	0.00±0.00c	89.14±2.01a	2.96±1.97bc	92.10±1.36a
	200	0.00±0.00c	11.66±3.19c	71.67±1.66a	83.33±1.92ab	0.00±0.00c	94.04±0.78a	0.49±0.49c	94.53±1.49a

94.04%;仅有不足10%的种子保持休眠,且原胁迫浓度越高,染色种子占比越低。与对照相比,仅150 mmol·L^{-1}和200 mmol·L^{-1}NaCl显著降低马利筋具活力种子,占比分别为71.19%和75.20%,其余处理下具活力种子占比均超过83.00%;显著提高苋菜具活力种子占比,具活力种子占比均超过90.95%,也表明高浓度盐胁迫处理下种子将通过休眠等策略以维持其种子活力(表2)。

将酸胁迫解除后未萌发马利筋种子进行复水处理,发现约7%~12%的种子因胁迫伤害而死亡,有约18%~31%的种子处于休眠状态;未萌发苋菜种子恢复萌发率最高仅为1.52%,无种子休眠,几乎所有未萌发种子因胁迫伤害全部死亡。不同pH处理下马利筋和苋菜具活力种子占比与对照间无差异或显著高于对照,表明酸胁迫未显著降低两种药用植物种子活力,但也表明酸胁迫处理可造成约10%的两种药用植物种子死亡,导致复水萌发期间无种子萌发(表3)。

3 讨 论

种子萌发是植物对环境胁迫响应的敏感阶段[16],萌发率、发芽势能最早,最直观地体现出胁迫的程度。有研究表明,苋菜(*A. mangostanu*)种子在150 mmol·L^{-1} NaCl处理下萌发率为95.33%,当盐浓度降至0 mmol·L^{-1}时,萌发率升高至98.67%,两种处理间萌发率无显著差异,但观察到发芽指数表现出显著差异,由此提出盐渍化环境下需尝试种植苋菜作为园林绿化材料的建议[17]。高志昊等[18]发现,15% PEG处理下饲草型燕麦(*Avena sativa*)品种"Shooter"种子萌发率与对照蒸馏水间无显著差异,但发芽指数差异极显著,对土壤水分变化极其敏感,为不抗旱品种。本研究结果表明,在pH值为3~6时马利筋种子萌发率显著降低,但发芽指数仅在pH为4.5和6时显著降低,由此反映出马利筋种子在土壤酸度较高时虽有近40%的种子萌发被抑制,但整体表现为出苗整齐、萌发速率高等现象,推测马利筋具有较高的耐酸性。

水分是影响种子萌发、早期幼苗建成的主要因子之一[19],不同PEG浓度处理被广泛用于种子萌发阶段耐旱性研究。本研究发现,马利筋和苋菜种子在PEG浓度为5%时种子萌发已被显著抑制,表明两种植物种子对干旱胁迫很敏感,这与鹿角杜鹃

表3 酸胁迫对马利筋和苋菜种子萌发数量特征的影响

Tab. 3 Effect of acid stress on germination quantitative characters of *Asclepias curassavica* and *Amaranthus tricolor*

处理		马利筋				苋菜			
		萌发率/%	恢复萌发率/%	染色种子占比/%	具活力种子占比/%	萌发率/%	恢复萌发率/%	染色种子占比/%	具活力种子占比/%
pH值	3	72.53±3.34b	0.00±0.00a	18.18±3.12b	90.71±1.78a	88.25±0.95ab	0.00±0.00a	1.04±0.60a	89.29±0.37ab
	3.5	74.26±3.43b	0.00±0.00a	18.66±2.97b	92.92±1.12a	82.00±3.89bc	0.00±0.00a	1.48±0.94a	83.49±3.15bc
	4	67.17±2.31bc	0.00±0.00a	25.39±2.12ab	92.57±2.82a	81.92±4.20bc	0.00±0.00a	1.52±0.97a	83.45±3.29bc
	4.5	57.71±0.86c	0.00±0.00a	30.85±2.54a	88.57±2.19a	86.47±2.26abc	0.00±0.00a	0.51±0.51a	86.99±2.11ab
	5	66.86±5.82bc	0.00±0.00a	25.06±3.72ab	91.93±2.15a	87.92±1.85ab	0.00±0.00a	0.00±0.00a	87.93±1.85ab
	6	57.94±2.06c	0.00±0.00a	31.15±4.02a	89.09±3.67a	91.47±1.88a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	91.47±1.88a
	CK	88.43±2.63a	0.00±0.00a	2.89±0.96c	91.31±1.69a	78.13±2.90c	0.00±0.00a	0.50±0.50a	78.63±2.58c

(*Rhododendron latoucheae*)种子萌发对干旱胁迫的响应结果相一致[20]。随着干旱胁迫程度增加,种子萌发几乎完全被抑制,很难有种子萌发甚至不萌发,这与一些植物如石茅(*Sorghum halepense*)种子的萌发特征相似[21]。但无论是马利筋还是苋菜种子,在PEG胁迫解除后,大量种子依旧完好且复水处理后大量萌发,表现出原胁迫浓度越高,恢复萌发率越高,尤其是20% PEG浓度下萌发率仅为5.84%的马利筋种子和0.00%的苋菜种子,恢复萌发率分别高达71.25%和78.97%,具活力种子占比超过80%,表明短暂的水分胁迫会影响两种药用植物种子萌发,但是并未使其丧失活性,当水分胁迫解除后,反而会促进种子萌发,由此可知,两种药用植物种子均具有一定的耐旱能力,干旱胁迫有利于马利筋和苋菜种子萌发。

土壤盐分影响植物种子萌发,较低浓度NaCl胁迫促进腺独行菜(*Lepidium apetalum*)种子萌发,高浓度则表现为抑制作用,总体上表现为"低促高抑"效应;但同属植物宽叶独行菜(*L. latifolium*)在各浓度盐胁迫下均表现为种子萌发被抑制,且抑制效应随浓度升高而增大[22-23]。本研究结果与宽叶独行菜对盐胁迫的响应相一致,盐胁迫对马利筋和苋菜种子萌发产生抑制作用,且随NaCl浓度增加抑制作用越明显。研究结果进一步表明当盐胁迫得到缓解或解除时,马利筋种子表现为保持活力进入休眠状态,苋菜种子则在复水后呈迅速且大量萌发态势,具有很高的恢复萌发能力,两种药用植物种子萌发对盐胁迫表现出不同的适应性反应。实验结果表明两种药用植物种子的萌发过程对盐胁迫十分敏感,盐分是其种子萌发过程的限制因子,在盐碱地栽培种植时可选择盐度较低的土地或种植前做好水分管理以提高种子萌发率,但两者未萌发种子对盐胁迫表现出的适应机制还有待进一步研究。

土壤酸碱度常会成为影响种子萌发的限制因子,有研究表明,多数植物种子在pH值过高或过低的环境中萌发均受到抑制,表现出萌发率下降、出苗不整齐及初始萌发时间延迟等现象。药食同源名贵中药材罗汉果(*Siraitia grosvenorii*)伯林2号种子在pH为4时,种子萌发率为13.33%,初始萌发时间较对照延迟了6 d[24]。还有一些植物种子萌发对环境酸碱度有极广的耐受范围,pH为2~12的土壤环境对意大利苍耳(*Xanthium italicum*)种子萌发虽有显著影响,但萌发率均高于75%[25]。本研究中,马利筋和苋菜种子均表现出强的耐酸胁迫能力,pH为3时分别有超过72%和80%的种子可以正常萌发,酸性环境不仅对苋菜种子萌发有促进作用,还能促进其种子提前萌发,这与Chauhan等[26]的结论相一致,表明两种植物对酸性环境具有很强的耐受性,适宜在我国南方一些地区不断酸化的土壤中种植。

如果将胁迫处理时萌发的种子、胁迫解除后复水恢复萌发的种子和保持休眠的种子均视为具有活力种子,那么具活力种子占比的高低在一定程度上能够反映出种子对胁迫环境的适应程度及所采取的萌发策略。本研究结果显示,马利筋和苋菜种子能敏锐地捕捉到环境的水分、盐分变化,当胁迫程度较轻微时,采取少量、缓慢的方式进行萌发;当胁迫程度增加时,则采取大量种子进入休眠的策略以维持长期的萌发活力,在环境适宜时便可恢复萌发。因此,尽管不同PEG和NaCl处理抑制马利筋和苋菜种子萌发,但两种植物具活力种子占比均较

高,在自然环境中,这部分具活力种子可形成短暂种子库,遇到适宜条件便会迅速萌发。同时本研究还发现,干旱、盐胁迫处理及复水后仍有少量马利筋和苋菜具活力的种子未萌发,这部分种子在自然环境中将可能形成持久种子库以维持种群延续[25]。由此反映出,马利筋和苋菜的种子可采取多种萌发策略分摊不可预测的环境风险以适应多变环境,为下一阶段的种群萌发更新提供来源和动力。

综上所述,马利筋和苋菜种子在萌发过程中对干旱和盐胁迫具有一定的耐性,对酸胁迫具有较强的耐性,但两种植物种子可采取不同的萌发策略以适应各种胁迫环境。因此,在马利筋和苋菜应用过程中,可以进行轻度的干旱、盐胁迫来促进种子萌发,在选择种植地时应避免高盐碱环境或做好土壤盐度的调节。酸性土壤环境对马利筋种子萌发的抑制作用较小,对苋菜种子萌发起到促进作用且促进种子提前,两者对酸性土壤环境具有强的适应性。

4 结 论

(1) 不同PEG和NaCl浓度处理显著抑制马利筋和苋菜种子萌发,萌发率和发芽指数均表现为随浓度增加而呈下降趋势。酸胁迫显著抑制马利筋种子萌发,但可促进苋菜种子萌发、萌发率和发芽指数均有不同程度提高。

(2) 不同PEG浓度、NaCl浓度和pH水平处理均在一定程度上延缓了马利筋和苋菜种子萌发速度。其中,PEG和NaCl浓度处理使马利筋种子初始萌发时间分别延后至第4 d和第5 d,苋菜种子为第3 d;各pH水平处理下马利筋种子初始萌发时间与对照基本一致,但可促进苋菜种子提前1 d萌发。

(3) 不同PEG和NaCl浓度处理下,未萌发的马利筋和苋菜种子经复水之后均有大量种子萌发,表明种子活力依旧存在;各pH水平处理可造成两种药用植物约10%的未萌发死亡。

参考文献(References):

[1] Flowers T J, Yeo A R. Ion relations of plants under drought and salinity[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1986, 13(1): 75–91.

[2] Acosta-Motos J R, Ortuño M F, Bernal-Vicente A, et al. Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms[J]. Agronomy, 2017, 7 (1): 18–56.

[3] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25: 239–250.

[4] Cristancbo R J A, Hanafi M N, Syed Omar S R, et al. Aluminum speciation of amended acid tropical soil and its effects on plant root growth[J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37: 811–827.

[5] Anjum S A, Xie X Y, Wang L C, et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(9): 2026–2032.

[6] Ludlow M M, Muchow R C. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments[J]. Advances in Agronomy, 1990, 43: 107–153.

[7] 戴炜, 唐宇翀, 喻娜, 等. 马利筋引种繁殖技术研究[J]. 园艺与种苗, 2021, 41(4): 52–53, 64. [Dai Wei, Tang Yuchong, Yu Na, et al. Study on introduction an proagation technology of *Asclepias curassavica*[J]. Horticulture and Seed, 2021, 41(4): 52–53, 64.]

[8] 陆云梅, 黄仁华, 刘鸿宇. 硒和丛枝菌根真菌处理对苋菜生长及硒积累的影响[J]. 福建农业学报, 2024, 39(5): 563–570. [Lu Yunmei, Huang Renhua, Liu Hongyu. Effects of selenium and arbuscular mycorrhizal fungi applications on growth, photosynthesis, and selenium accumulation of *Amaranthus tricolor* L.[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2024, 39(5): 563–570.]

[9] 袁玮琪. 马利筋新型C_{21}甾体化合物Asclepiasterol逆转P-gp介导肿瘤多药耐药的作用及机制研究[D]. 广州: 暨南大学, 2016. [Yuan Weiqi. The Effect and Mechanism Study of Asclepiasterol, A Novel C_{21} Steroidal Glycoside Derived from *Asclepias curassavica* Reversing P-gp-mediated Multidrug Resistance[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.]

[10] 王世敏, 程金鹏. 马利筋组织培养初探[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15263–15274, 15267. [Wang Shimin, Cheng Jinpeng. Preliminary research on the tissue culture of *Asclepsus curassavica*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(25): 15263–15274, 15267.]

[11] 王廷芹, 甘秋霞, 李倩如. 盐胁迫对苋菜种子的发芽及幼苗生长的影响[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 10–15, 32. [Wang Yanqin, Gan Qiuxia, Li Qianru. Effect of salt stress on seed germination and seedling growth of Amaranth[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2021, 38(1): 10–15, 32.]

[12] 蒋妮, 覃柳燕, 李力, 等. 环境胁迫对药用植物次生代谢产物的影响[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(8): 1528–1532. [Jiang Ni, Qin Liuyan, Li Li, et al. Influence of environmental stress on medicinal plant secondary metabolites[J]. Hubei Agriultural Sciences, 2012, 51(8): 1528–1532.]

[13] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. Plant Physiology, 1973, 51(5): 914–916.

[14] 张春平, 何平, 何俊星, 等. 药用保护植物黄连种子萌发特性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(9): 89–93. [Zhang Chunping, He Ping, He Junxing, et al. Characteristics of seed germination of the protected medicinal plant *Coptis chinensis*[J]. Jour-

nal of Southwest University (Natural Science Edition), 2008, 30 (9): 89-93.]

[15] 于婵, 张依琳, 李秋莹, 等. 盐碱胁迫对牛至种子萌发和幼苗生理生化特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(6): 1882-1892. [Yu Chan, Zhang Yilin, Li Qiuying, et al. Effects of saline-alkali stresses on seed germination and seedling physiological and biochemical characteristics of *Oregano vulgare*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1882-1892.]

[16] Samarah N, Alqudah A. Effects of late-terminal drought stress on seed germination and vigor of barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. Archives of Agromomy and Soil Science, 2011, 57(1): 27-32.

[17] 徐宁伟, 路斌, 高慧, 等. 盐胁迫对两种苋科植物种子萌发的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 138-143. [Xu Ningwei, Lu Bin, Gao Hui, et al. Effects of salt stress on seed germination of two Amaranthaceae species[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(8): 138-143.]

[18] 高志昊, 李雪颖, 兰剑, 等. 干旱胁迫条件下不同饲用燕麦品种种子萌发指标比较与评价[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1210-1218. [Gao Zhihao, Li Xueying, Lan Jian, et al. Comparison and evaluation of seed germination indexes of different forage-type Oat cultivars under PEG-6000 stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30 (5): 1210-1218.]

[19] Lai L M, Chen L J, Zheng M Q, et al. Seed germination and seedling growth of five desert plants and their relevance to vegetation restoration[J]. Ecology and Evolution, 2019, 9(4): 2160-2170.

[20] 李畅, 苏家乐, 刘晓青, 等. 干旱胁迫对鹿角杜鹃种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(7): 1421-1427. [Li Chang, Su Jiale, Liu Xiaoqing, et al. Effects of drought stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Rhododendron latoucheae*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2015, 35(7): 1421-1427.]

[21] 王亚, 刘延, 范志伟, 等. 入侵植物石茅种子萌发及幼苗生长对干旱胁迫的响应特征[J]. 草业科学, 2023, 40(8): 2020-2027. [Wang Ya, Liu Yan, Fan Zhiwei, et al. Response characteristics of seed germination and seedling growth of the invasive plant *Sorghum halepense*[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(8): 2020-2027.]

[22] Li R, Shi F, Fukuda K. Interactive effects of salt and alkali stresses on seed germination, germination recovery, and seedling growth of a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae) [J]. South African Journal of Botany, 2010, 76: 380-387.

[23] 李天永, 严子柱, 姜生秀. 两种独行菜种子萌发对不同浓度NaCl胁迫的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(1): 88-94. [Li Tianyong, Yan Zizhu, Jiang Shengxiu. Responses of seed germination of two *Lepidium* species to different concentrations of NaCl stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(1): 88-94.]

[24] 曾荔琦, 曾嘉欣, 杨蕾蕾, 等. 罗汉果伯林2号种子形态结构及萌发特性[J]. 亚热带植物科学, 2023, 52(4): 293-300. [Zeng Liqi, Zeng Jiaxin, Yang Leilei, et al. Seed morphology and germination characteristics of *Siraitia grosvenorii* Bolin No. 2[J]. Subtropical Plant Science, 2023, 52(4): 293-300.]

[25] 何影, 马淼. 入侵植物意大利苍耳种子萌发对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1226-1234. [He Ying, Ma Miao. Responses of seed germination of the invasive plant *Xanthium italicum* to environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (4): 1226-1234.]

[26] Chauhan B S, Gill G, Preston C. Factors affecting seed germination of little mallow (*Malva parvilfora*) in southern Australia[J]. Weed Science, 2006, 54(6): 1045-1050.

Effects of drought, salt, and acidity stresses on *Asclepias curassavica* and *Amaranthus tricolor* seed germination

JIA Fengqin, HUANG Mintao, DENG Li, LI Jinling,
LIANG Meihua, YI Hongwei, SONG Xijuan
(College of Forestry Engineering, Guangxi Eco-Engineering Vocational and Technical College, Liuzhou 545004, Guangxi, China)

Abstract: The effect of environmental factors on the seed germination of two medicinal plants, *Asclepias curassavica* and *Amaranthus tricolor*, was studied using PEG-6000, NaCl, and pH gradient solutions to simulate drought, salt, and acidity stresses, respectively. The results provide the basis for their cultivation in arid, saline-alkali areas and the production of high-quality medicinal materials. The findings revealed that the seed germination percentage and index of *A. curassavica* and *A. tricolor* decreased with increasing PEG and NaCl concentrations. After 14 days of stress, the nongerminated seeds could rapidly germinate after rehydration and did not lose their vitality. TTC staining of the nongerminated seeds after rehydration revealed that the seeds remained active; the viable seed proportion of the two medicinal plants was significantly higher than in the control or did not decrease significantly, with mean values of 84% and 90%, respectively. At pH 3-6, the *A. curassavica* and *A. tricolor* seed germination percentages were 57% and 83%, while the nongerminated seeds of *A. curassavica* and *A. tricolor* lost their vitality. The percentages of dead seeds were 10% and 15%, and the proportions of viable seeds were 91% and 87%, respectively, for *A. curassavica* and *A. tricolor*. The two medicinal plants displayed a certain tolerance to drought and salt stress and a strong tolerance to acid stress during germination. The two plants can adopt different germination strategies, such as advanced or delayed germination or dormancy, to adapt to their environmental stresses. This study clarified the seed germination characteristics and differences of *A. curassavica* and *A. tricolor* under three abiotic stress factors. It provides a theoretical basis for producing and improving the quality of two medical plants.

Keywords: medicinal plant; *Asclepias curassavica*; *Amaranthus tricolor*; seed germination; tolerance